بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی عمران

بتن قلیافعال غلتکی روسازی راه

Roller Compacted Alkali Activated Concrete Pavement

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه

محسن باستانی

استاد راهنما

دکتر کیاچهر بهفرنیا

۱۳۹۳

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات

و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه

(رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

توانا بود هرکه دانا بود

ز دانش دل پیر برنا بود

ازین پرده برتر سخن گاه نیست

ز هستی مراندیشه را راه نیست

"فردوسی بزرگ"

نخستین سپاس و ستایش از آن خداوندی است که چنین راهی را گشود و هر دم مرا یاری نمود و آنگاه پی به شیرینی رنج دانش بردم که هنوز به سان قطره ای در دریای بیکران او سرگردان...

برخود بـایســـتـه می‌دانم ابتدا از اســـتاد راهنمای گرامی آقای دکتر کیاچهر بهفرنیا که همواره با کمال متانت، راهنما بوده و با وجود مشکلات بسیار، انگیزه را در من بیشتر نمودند، کمال سپاس را بجای آورم.

سپس از استاد گرامی آقای دکتر افتخار برای تلاش‌های فراوانشان به گرمی سپاس گزاری می‌کنم.

از دوسـتان خوبم که دوران خوشـی را با آن‌ها گذراندم و از راهنمایی‌هایشـان استفاده نمودم و به ویژه دوست دیرینه‌ام مهندس حبیب امیرشاه‌کرمی که در مباحث شیمی از تخصص ایشان بهره بردم، تشکر می‌کنم.

در انتها از تمامی خوبان که در این راه مرا درک کردند، کمال سـپاس را بجای آورده و آرزوی شـادکامی هر چه بیشتر برایشان دارم.

محسن باستانی

۲۶ بهمن ۱۳۹۳

تقدیم به:

گرامی‌ترین موجود هستی که همواره تکیه‌گاهم بوده

لطیف‌ترین واژه از زمان زیست

نیکوترین و صمیمی‌ترین دوستانم

آرزوی سلامتی و شادکامی برایتان دارم، پدر، مادر، برادر و خواهر

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هفت

فهرست اشکال ..... ده

فهرست جداول ..... سیزده

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه ۲

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ اهداف تحقیق ٦

۱-۳ پیکره‌بندی فصول پایان‌نامه ٦

فصل دوم: بتن غلتکی قلیافعال ۷

۲-۱ مقدمه ۷

۲-۲ انواع روسازی‌های بتنی ۹

۲-۲-۱ روسازی بتنی ساده درز دار ۹

۲-۲-۲ روسازی بتنی مسلح درز دار ۱۰

۲-۲-۳ روسازی بتنی مسلح پیوسته ۱۰

۲-۲-۴ روسازی بتنی پیش‌تنیده ۱۰

۲-۳ روسازی بتنی غلتکی (RCCP) ۱۱

۲-۳-۱ تاریخچه ۱۱

٤-۲ خواص بتن غلتکی روسازی ۱۲

۲-۴-۱ کارآیی ۱۳

۲-۴-۲ آب انداختگی ۱٤

۲-۴-۳ جرم حجمی و درجه تراکم ۱٤

۲-۴-۴ مقاومت فشاری ۱۵

۲-۴-۵ مقاومت خمشی ۱۸

۲-۴-۶ مقاومت کششی برزیلی ۱۹

۲-۴-۷ مدول الاستیسیته ۱۹

۲-۴-۸ خستگی ۱۹

۲-۴-۹ دوام ۲۰

۲-۴-۱۰ جمع‌شدگی ناشی از خشک شدگی ۲۱

۲-۴-۱۱ اتصال بین لایه‌ها ۲۱
۲-۴-۱۲ هموارى سطح ۲۲
۲-۴-۱۳ عمل‌آورى و مراقبت از سطح ۲۳
۲-۴-۱۴ زمان کوبش ۲٤
۲-۵ بتن قلیا فعال ۲٦
۲-۵-۱ سرباره ۲۸
۲-۵-۲ محلول قلیایی فعال کننده ۳۲
۲-۵-۳ مکانیزم گیرش بتن قلیا فعال سرباره‌ای ۳۳
۲-۵-۴ ریز ساختار بتن قلیا فعال سرباره‌ای ۳٤
۲-۶ عوامل مؤثر بر خصوصیات مکانیکی بتن قلیا فعال سرباره‌ای ۳۵
۲-۶-۱ ترکیب شیمیایی سرباره ۳۵
۲-۶-۲ محلول قلیایی فعال کننده ۳۵
۲-۶-۳ شرایط عمل‌آورى ٤۰
۲-٦-٤ افت بتن قلیا فعال ٤۲
۲-۷ بتن غلتکی قلیافعال ٤۳
۲-۸ جمع‌بندی فصل ٤٤
فصل سوم: مشخصات مصالح، معرفی طرح اختلاط و آزمایشات، روش انجام کار ٤۵
۳-۱ مقدمه ٤۵
۳-۲ مصالح ٤۵
۳-۲-۱ سنگدانه‌ها ٤٦
الف- درشت‌دانه ٤٦
ب- ریزدانه ٤۷
پ- دانه‌بندی ٤۸
۳-۲-۲ مصالح چسباننده ٤۹
الف- سرباره ٤۹
ب- سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3) ۵۰
پ-هیدروکسید سدیم ($NaOH$) ۵۱
۳-۳ طرح اختلاط بتن غلتکی روسازی راه ۵۳
۳-۳-۱ طرح اختلاط با استفاده از روش‌های تراکم خاک ۵٤
۳-۴ روش ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی ۵۵

الف- نحوه‌ی اختلاط ٥٦
ب- نحوه‌ی قالب‌گیری ٥٧
٣-٥ معرفی آزمایشات ٥٩
٣-٥-١ آزمایش تعیین رطوبت بهینه ٦٠
٣-٥-٢ مقاومت فشاری ٦٢
٣-٥-٣ مقاومت خمشی ٦٣
٣-٦ طرح اختلاط بتن غلتکی قلیافعال ٦٤
٣-٧ جمع‌بندی فصل ٦٧
فصل چهارم: نتایج آزمایشگاهی و تحلیل آن‌ها ٦٨
٤-١ مقدمه ٦٨
٤-٢ آزمایشات تعیین رطوبت بهینه ٦٨
الف- تأثیر هیدروکسید سدیم بر رطوبت بهینه ٧٨
ب- تأثیر سیلیکات سدیم بر رطوبت بهینه ٧٩
٤-٣ خصوصیات ظاهری بتن قلیافعال غلتکی ٨٥
٤-٤ مقاومت فشاری ٨٨
الف- تأثیر سیلیکات سدیم بر مقاومت فشاری ٩٠
ب- تأثیر غلظت هیدروکسید سدیم بر مقاومت فشاری ٩١
٤-٥ مقاومت خمشی ٩٣
٤-٦ تأثیر میزان سیلیکات سدیم محلول در زمان کوبش ٩٤
٤-٧ تأثیر غلظت هیدروکسید سدیم بر روند کسب مقاومت ٩٨
٤-٨ بررسی تأثیر عمل‌آوری مرطوب بر مقاومت بتن غلتکی قلیافعال ١٠١
٤-٩ جمع‌بندی فصل ١٠٣
فصل پنجم: نتیجه‌گیری و ارائه‌ی پیشنهادات ١٠٤
٥-١ مقدمه ١٠٤
٥-٢ نتیجه‌گیری ١٠٥
٥-٣ پیشنهادها ١٠٧
مراجع ١٠٨

فهرست اشکال

شکل ۱-۱ تأمین فضای سبز کارخانه‌ی فولاد مبارکه اصفهان [۱].....۳

شکل ۱-۲ تأمین فضای سبز کارخانه‌ی سیمان بوکان [۲].....۳

شکل ۲-۱ ظاهر بتن غلتکی تازه [۱۰].....۸

شکل ۲-۲ دستگاه وی‌بی با سربار ۱۲ کیلوگرمی [۹].....۱۳

شکل ۲-۳ رابطه‌ی چگالی- درصد رطوبت برای بتن غلتکی تحقیق حاضر.....۱۵

شکل ۲-٤ تأثیر درجهی تراکم روی مقاومت فشاری بتن غلتکی [۱۷].....۱۷

شکل ۲-۵ اندرکنش دو پارامتر نسبت آب به سیمان و مقاومت فشاری [۹].....۱۷

شکل ۲-٦ مقاومت فشاری-فاصله‌ی زمانی بین اختلاط و کوبش (مواد سیمانی=kg/m^3 ۱۵۰) [۲۹].....۲۵

شکل ۲-۷ مقاومت فشاری-فاصله‌ی زمانی بین اختلاط و کوبش (مواد سیمانی=kg/m^3 ۲۱۰) [۲۹].....۲۵

شکل ۲-۸ نفوذپذیری-فاصله‌ی زمانی بین اختلاط و کوبش (مواد سیمانی=kg/m^3 ۲۱۰) [۲۹].....۲٦

شـکل ۲-۹ تأثیر نوع محلول فعال کننده بر مقاومت فشـاری در عمل‌آوری در(a) دمای محیط(b) دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد [٦۳].....۳۷

شـکل ۲-۱۰ تأثیر نوع محلول فعال کننده بر مقاومت فشـاری در عمل‌آوری در(a) دمای محیط(b) دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد [٦۳].....۳۷

شـکل ۲-۱۱ سـمت چپ تصـویر میکروسـکوپ الکترونی و سـمت راسـت نتایج آزماش EDX ، (a) ملات با $n = 0.05$ و $M_s = 1.5$ ، (b) ملات با $n = 0.25$ و $M_s = 0.6$ ، (c) ملات فعال شده توسط هیدروکسید سدیم [۴۶] ۳۹

شکل ۲-۱۲ تأثیر دمای محیط بر زمان گیرش [٦۷].....٤۰

شکل ۲-۱۳ تأثیر دمای محیط بر کارآیی [٦۷].....٤۱

شکل ۲-۱٤ تأثیر دمای عمل‌آوری بر مقاومت فشاری بتن قلیافعال سرباره‌ای [٦۳].....٤۲

شکل ۲-۱۵ تأثیر رطوبت در عمل‌آوری حرارتی بر مقاومت فشاری بتن قلیا فعال سرباره‌ای [٦۳].....٤۲

شکل ۳-۱ منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ی مصرفی.....٤۸

شکل ۳-۲ سرباره‌ی آسیاب شده‌ی کوره بلند ذوب‌آهن.....٤۹

شکل ۳-۳ سلیکات سدیم مورد استفاده در این تحقیق..... ۵۱

شکل ۳-٤ هیدروکسید سدیم مورد استفاده در این تحقیق..... ۵۲

شکل ۳-۵ مخلوط کن استوانه‌ای مورد استفاده در این تحقیق..... ۵٦

شکل ۳-٦ چکش ارتعاشی مورد استفاده با کله‌ی کوبشی مستطیلی..... ۵۸

شکل ۳-۷ قالب مکعبی ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متری..... ۵۸

شکل ۳-۸ قالب منشوری ۳۵۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متری..... ۵۹

شکل ۳-۹ ترتیب مراحل کوبش نمونه‌ی منشوری..... ۵۹

شکل ۳-۱۰ دستگاه سنجش مقاومت فشاری ELE..... ٦۲

شکل ۳-۱۱ شکل‌های گسیختگی رضایت بخش نمونه‌های مکعبی آزمایش مقاومت فشاری مطابق با استاندارد BS 1881 [۷٦]..... ٦۲

شکل ۳-۱۲ تناسب ابعادی آزمایش خمش یک‌طرفه..... ٦۳

شکل ۳-۱۳ دستگاه سنجش مقاومت خمشی..... ٦٤

شکل ۳-۱٤ ظاهر کلوخه‌ای بتن طرح اختلاط S1..... ٦۵

شکل ٤-۱ نمونه‌ی مکعبی ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متری تهیه شده برای آزمایش تعیین رطوبت بهینه، طرح اختلاط N2-S3، نوبت دوم..... ۷۰

شکل ٤-۲ نمونه‌ی مکعبی ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متری تهیه شده برای آزمایش تعیین رطوبت بهینه، طرح اختلاط N2-S3، نوبت چهارم..... ۷۰

شکل ٤-۳ نمودار تعیین درصد رطوبت بهینه طرح‌های N2-S3، N2-S9 و N2-S15..... ۷۲

شکل ٤-٤ نمودار تعیین درصد رطوبت بهینه طرح‌های N4-S3، N4-S9 و N4-S15..... ۷٤

شکل ٤-۵ نمودار تعیین درصد رطوبت بهینه طرح‌های N6-S3، N6-S9 و N6-S15..... ۷٦

شکل ٤-٦ نمودار درصد رطوبت بهینه-غلظت هیدروکسید سدیم..... ۷۹

شکل ٤-۷ نمودار درصد رطوبت بهینه-نسبت سود به سیلیکات..... ۷۹

شکل ٤-٨ محلول هیدروکسید سدیم ٦ مولار و سیلیکات سدیم با نسبت ٣ (a) بلافاصله پس از ساخت آن، (b) ٢٠ دقیقه پس از ساخت آن، در حالت سکون..... ٨٠

شکل ٤-٩ قسمت تحتانی نمونه‌ی طرح اختلاط N6-S9 (a) و نمونه‌ی طرح اختلاط N2-S9 (b) پس از قالب گیری ٨٦

شکل ٤-١٠ نمونه‌های مکعبی طرح اختلاط N6-S9، ستون اول از سمت چپ سطح فوقانی نمونه، ستون دوم سطح جانبی نمونه و ستون سوم سطح تحتانی نمونه..... ٨٦

شکل ٤-١١ نمونه‌های مکعبی طرح اختلاط N2-S9، ستون اول از سمت چپ سطح فوقانی نمونه، ستون دوم سطح جانبی نمونه و ستون سوم سطح تحتانی نمونه..... ٨٧

شکل ٤-١٢ ظاهر قسمت درونی نمونه‌ی طرح اختلاط (a) N2-S3 و طرح اختلاط (b) N2-S15 ..... ٨٧

شکل ٤-١٣ نگهداری نمونه‌ها درون پلاستیک..... ٨٨

شکل ٤-١٤ آزمایش تعیین مقاومت فشاری طرح اختلاط N2-S3..... ٨٨

شکل ٤-١٥ مقاومت فشاری ٢٨ روزه–نسبت سود به سیلیکات..... ٩١

شکل ٤-١٦ مقاومت فشاری ٢٨ روزه– غلظت هیدروکسید سدیم..... ٩٢

شکل ٤-١٧ مقاومت فشاری ٧ روزه و ٢٨ روزهی بتن غلتکی قلیافعال..... ٩٢

شکل ٤-١٨ نمونه‌های منشوری (a) طرح اختلاط N2-S9، (b) طرح اختلاط N4-S3..... ٩٣

شکل ٤-١٩ نتایج مقاومت خمشی ٢٨ روزه..... ٩٣

شکل ٤-٢٠ مقاومت فشاری ٧ روزه–فاصله‌ی زمانی بین اختلاط و کوبش (طرح اختلاط N2-S3)..... ٩٦

شکل ٤-٢١ مقاومت فشاری ٧ روزه–فاصله‌ی زمانی بین اختلاط و کوبش (طرح اختلاط N2-S9)..... ٩٧

شکل ٤-٢٢ مقاومت فشاری ٧ روزه–فاصله‌ی زمانی بین اختلاط و کوبش (طرح اختلاط N2-S15)..... ٩٨

شکل ٤-٢٣ مقاومت فشاری بتن– سن بتن..... ١٠١

شکل ٤-٢٤ ظاهر نمونه‌ی طرح اختلاط N2-S15 تحت عمل‌آوری خشک (a) و عمل‌آوری مرطوب (b) ١٠٣

فهرست جداول

جدول ۲-۱ مقاومت فشاری مغزه‌های گرفته شده از چند پروژه بتن غلتکی روسازی در کانادا [۱٤].....۱٦

جدول ۲-۲ نتایج مقاومت خمشی و مقاومت کششی برزیلی در برخی از پروژه‌های آمریکا [۱۴].....۱۸

جدول ۲-۳ حجم تولید سرباره‌ی بدست آمده از تولید آهن و فولاد [٤٤].....۳۱

جدول ۳-۱ مشخصات درشتدانه‌ی استفاده شده در این تحقیق.....٤۷

جدول ۳-۲ مشخصات ماسه‌ی مصرفی در این تحقیق.....٤۷

جدول ۳-۳ محدوده‌ی دانه‌بندی توصیه شده برای استفاده در طرح اختلاط روسازیهای بتن غلتکی [۱۴].....٤۸

جدول ۳-٤ درصد وزنی ترکیبات شیمیایی سرباره‌ی مورد استفاده.....۵۰

جدول ۳-۵ درصد وزنی ترکیبات شیمیایی سیلیکات مورد استفاده.....۵۱

جدول ۳-٦ نتایج مربوط به آزمایش مقاومت فشاری جهت انتخاب نسبت سود به سیلیکات.....٦۵

جدول ۳-۷ مشخصات طرح‌های اختلاط اصلی.....٦٦

جدول ٤-۱ جزئیات طرح اختلاط N2-S3 برای مرحله‌ی اول آزمایش تعیین رطوبت بهینه.....٦۹

جدول ٤-۲ نتایج آزمایشات تعیین درصد رطوبت بهینه طرح‌های N2-S3، N2-S9 وN2-S15.....۷۳

جدول ٤-۳ نتایج آزمایشات تعیین درصد رطوبت بهینه طرح‌های N4-S3، N4-S9 وN4-S15.....۷۵

جدول ٤-٤ نتایج آزمایشات تعیین درصد رطوبت بهینه طرح‌های N6-S3، N6-S9 وN6-S15.....۷۷

جدول ٤-۵ جزئیات طرح اختلاط N2-S3.....۸۱

جدول ٤-٦ جزئیات طرح اختلاط N2-S9.....۸۱

جدول ٤-۷ جزئیات طرح اختلاط N2-S15.....۸۲

جدول ٤-۸ جزئیات طرح اختلاط N4-S3.....۸۲

جدول ٤-۹ جزئیات طرح اختلاط N4-S9.....۸۳

جدول ٤-۱۰ جزئیات طرح اختلاط N4-S15.....۸۳

جدول ٤-۱۱ جزئیات طرح اختلاط N6-S3.....۸٤

جدول ٤-١٢ جزئیات طرح اختلاط N6-S9..... ٨٤
جدول ٤-١٣ جزئیات طرح اختلاط N6-S15..... ٨٥
جدول ٤-١٤ نتایج مقاومت فشاری ٧ روزه..... ٨٩
جدول ٤-١٥ نتایج مقاومت فشاری ٢٨ روزه..... ٨٩
جدول ٤-١٦ نتایج آزمایش تعیین مقاومت خمشی..... ٩٤
جدول ٤-١٧ مقاومت فشاری ٧ روزه نمونه‌های طرح اختلاط N2-S3 با زمان‌های کوبش مختلف (MPa)..... ٩٥
جدول ٤-١٨ مقاومت فشاری ٧ روزه نمونه‌های طرح اختلاط N2-S9 با زمان‌های کوبش مختلف (MPa)..... ٩٥
جدول ٤-١٩ مقاومت فشاری ٧ روزه نمونه‌های طرح اختلاط N2-S15 با زمان‌های کوبش مختلف (MPa)..... ٩٦
جدول ٤-٢٠ مقاومت فشاری طرح اختلاط N2-S9 در سنین مختلف..... ٩٩
جدول ٤-٢١ مقاومت فشاری طرح اختلاط N4-S9 در سنین مختلف..... ٩٩
جدول ٤-٢٢ مقاومت فشاری طرح اختلاط N6-S9 در سنین مختلف..... ٩٩
جدول ٤-٢٣ نتایج مقاومت فشاری ٢٨ روزه تحت عمل‌آوری خشک و مرطوب..... ١٠٢

چکیده

ایران با ظرفیت تولید بیش از ۸۰ میلیون تن سیمان در سال، رتبه‌ی سوم تولید سیمان در جهان را داشته و این رقم در سال‌های آتی به بیش از ۱۲۰ میلیون تن در سال خواهد رسید. با توجه به افزایش نرخ قیر در کشور در دهه‌ی اخیر، کاربرد رویه‌های بتنی به عنوان یکی از پتانسیل‌های جایگزینی رویه‌های آسفالتی در کشور مطرح شده است. با تولید هر تن سیمان، حدود ۱ تن گاز کربن‌دی‌اکسید وارد اتمسفر می‌گردد که با توجه به میزان تولید سالیانه‌ی سیمان در کشور، بازنگری در صنعت تولید سیمان اهمیت بسیاری پیدا می‌کند. سرباره‌ی قلیا فعال با فعال‌سازی سرباره‌ی آسیاب شده‌ی کوره بلند ذوب‌آهن توسط محلول‌های قلیایی، به عنوان یک ماده‌ی چسباننده در بتن، از دهه‌های اخیر به عنوان جایگزین سیمان، مورد تحقیق و حتی در برخی کشورها نیز مورد استفاده قرار گرفته است.

در این پایان‌نامه امکان استفاده از این نوع چسباننده در بتنِ غلتکی روسازی راه، مورد بررسی قرار گرفته است. سرباره‌ی آسیاب شده‌ی کارخانه‌ی ذوب‌آهن اصفهان توسط محلول هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم فعال شده است. سرباره به میزان ۱۰ درصد وزن مصالح خشک انتخاب شده و غلظت‌های مختلف هیدروکسید سدیم به همراه نسبت‌های مختلف سیلیکات سدیم برای محلول قلیایی، مورد آزمایش قرار گرفته است. آزمایش تعیین رطوبت بهینه، مقاومت فشاری و مقاومت خمشی بر روی نمونه‌ها، جهت بررسی تأثیر غلظت هیدروکسید سدیم و میزان سیلیکات سدیم و همچنین آزمایشی در راستای پیدا کردن زمان بهینه برای متراکم کردن بتن، انجام گرفته است. به طور کلی رطوبت مورد نیاز جهت تراکم حداکثر این نوع بتن غلتکی پایین‌تر از بتن غلتکی معمولی مشاهده شد. همچنین با وجود خمیر چسباننده‌ی کمتر محدوده‌ی مقاومت فشاری و خمشی آن بالاتر از بتن غلتکی معمولی بدست آمد. زمان گیرش اولیه‌ی این بتن، فرصت کافی برای حمل، پخش و تراکم آن را فراهم می‌کند. این بتن بدون عمل‌آوری مرطوب به حداکثر مقاومت خود خواهد رسید که این موضوع صرفه‌جویی اقتصادی قابل توجهی را از جنبه‌ی تولید و اجرا سبب می‌گردد.

کلمات کلیدی: روسازی بتن غلتکی، بتن قلیا فعال، سرباره‌ی ذوب‌آهن، هیدروکسید سدیم، سیلیکات سدیم، رطوبت بهینه، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، زمان کوبش.

۱ فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

تخریب پی در پی آسفالت جاده‌های سراسر کشور به خاطر مسائل مختلف و در نتیجه تعویض آن‌ها، منجر به صرف زمان و هزینه، همچنین در بسیاری از موارد باعث تصادفات و حوادث ناخوشایند و جبران‌ناپذیر می‌گردد. از این رو پیدا کردن آسفالتی متناسب با ویژگی‌های آسفالت قیری، از جنس دیگر به طوری که معایب آن را برطرف و محاسن آن را حفظ کند، مورد توجه محققان قرار گرفته است. از دهه‌های اخیر دانشمندان در راستای پیدا کردن ماده‌ای مناسب و جایگزین آسفالت قیری، بتن غلتکی را معرفی کردند. اسلامپ صفر این بتن باعث شده است که حمل و نقل و اجرای آن با همان تجهیزات آسفالت قیری امکان‌پذیر باشد. صلبیت این نوع آسفالت نسبت به آسفالت قیری باعث برطرف شدن برخی نواقص آن از جمله تغییر شکل ناشی از گرم شدن آسفالت در اثر تابش نور خورشید، موج برداشتن و تو رفتگی، ترک‌های سوسماری و... شده، همچنین عمق زیرسازی را می‌توان بر همین اساس کاهش داد که این امر موجب صرفه‌جویی در زمان و هزینه می‌گردد. در مناطق و شهرک‌های صنعتی به دلیل حمل و نقل‌های سنگین، طاقت آسفالت قیری پایین بوده و باید به طور مرتب تعمیر و تعویض شود و یا به خاطر بی‌توجهی مسئولین و صرف هزینه‌های زیاد، در اغلب موارد آسفالت مناسبی برای دسترسی به کارخانجات وجود ندارد. همچنین چون در این مناطق سرعت بالا برای وسایل نقلیه نیاز نیست، بتن غلتکی به خاطر مقاومت بالای آن بهترین گزینه است.

اما از آن طرف به خاطر سطح خشن آن نسبت به سطح نرم آسفالت قیری منجر به ایجاد سروصدا در اثر عبور لاستیک بر روی آن می‌شود و برای مسیرهایی که سرعت طراحی در آن بالا است، نیاز به یک لایه روکش آسفالتی بر روی آن دارد.

امروزه موضوعاتی که ذهن دانشمندان را به خود مشغول کرده و باعث نگرانی‌های آن‌ها شده، مسئله‌ی صرفه‌جویی در مصرف انرژی به منظور ذخیره کردن منابع انرژی تجدیدناپذیر، برای نسل‌های آینده و همچنین حفظ محیط زیست از آلودگی‌های ایجاد شده پس از انقلاب صنعتی است. رایج‌ترین روشی که برای حفظ محیط زیست از آن استفاده می‌شود، تأمین فضای سبز کافی برای تصفیه هوا است که اغلب کارخانجات بزرگ از جمله فولاد و سیمان از این روش استفاده می‌کنند. در شکل ۱-۱ فضای سبز تعبیه شده برای کارخانه‌ی فولاد مبارکه‌ی اصفهان و شکل ۱-۲ کارخانه‌ی سیمان بوکان نشان داده شده است.

شکل ۱-۱ تأمین فضای سبز کارخانه‌ی فولاد مبارکه اصفهان [۱]

شکل ۱-۲ تأمین فضای سبز کارخانه‌ی سیمان بوکان [۲]

این راهکار اگرچه مثمر ثمر است ولی خود نیاز به صرف هزینه و مصرف بالای آب دارد. بنابراین پیدا کردن روش‌های دیگری که آلودگی‌های تولید شـده را کاهش دهد، بهتر از تصـفیه کردن آن اسـت. یکی از این روش‌ها، استفاده از مواد بازیافتی در صنعت است. این روش علاوه بر حفظ منابع و مصالح اولیه، منجر به کاهش مصرف انرژی در راسـتای حفظ محیط زیسـت می‌گردد. به عنوان مثال در صـنعت تولید فولاد مقدار زیادی انرژی برای ذوب سنگ آهن مصرف می‌شود تا ناخالصی‌های آن جدا شده و آهن خالص بدست آید. بدیهی است که صرف این مقدار انرژی منجر به آلودن محیط زیسـت، در اثر اسـتفاده از سـوخت‌های فسـیلی می‌گردد. همچنین مقدار زیادی آب برای خنک کردن آن لازم اسـت که این امر نیز باعث ایجاد آلودگی گرمایی برای آب می‌شـود. از آن طرف در صـنعت تولید سیمان، برای پختن مواد اولیه نیاز به مقدار زیادی انرژی وجود دارد تا لجنی که در اثر مخلوط کردن مواد اولیه (آهک + خاک رس) با آب (به مقدار ۵۰٪ وزنی) بدست می‌آید را در حدود ۱۱۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد حرارت داد [۳]. این مقدار در حدود ۱۷۰۰ تا ۱۸۰۰ میلیون ژول برای هر تن کلینکر است که بر طبق این آمار، صنعت تولید سیمان پس از آلومینیوم و فولاد، رتبه‌ی سوم را در مصرف انرژی از آن خود کرده است. همچنین مقدار ۵٪ از کل انرژی در صنعت را به خود اختصاص داده است [۴]. علاوه بر این تولید سیمان، مقدار زیادی گاز کربن‌دی‌اکسید در اثر کلسینه کردن $CaCO_3$ (۱/۲ تن سـنگ آهک برای تولید ۱ تن کلینکر سـیمان پرتلند معمولی لازم اسـت) تولید می‌کند. طبق آمار گرفته شـده در سـال ۲۰۰۷، انتشـار جهانی گاز کربن‌دی‌اکسید از تولید سیمان، ۰/۸۸ تن برای هر تن کلینکر بوده اسـت. طبق این آمار سـالانه در حدود ۲ گیگا تن گاز کربن‌دی‌اکسـید در اثر تولید سـیمان وارد اتمسفر می‌گردد [۵]. همچنین گاز کربن‌دی‌اکسـید ناشـی از تولید سـیمان تا سـال ۲۰۲۰، ۱۰۰٪ افزایش پیدا می‌کند [۶]. طبق اعلام سـازمان بین‌المللی انرژی[1] در سال ۲۰۰۷، بین ۶٪ تا ۷٪ کل انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید به اتمسفر مربوط به صنعت تولید سیمان است [۷]. همچنین به ازای هر تن کلینکرِ سیمان پرتلند، ۱/۵ تا ۱۰ کیلوگرم گاز NO_x، بسته به نوع سیمان وارد اتمسفر می‌شود [۶].

در صنعت تولید فولاد، کف حاصل از ناخالصی‌های سنگ آهن که در هنگام ذوب سنگ آهن به بالای کوره می‌آید، توسـط کانالی خارج شـده و پس از سـرد کردن سریع آن، در محل مناسبی دپو می‌شود. تاکنون این محصول در صـنعت ما تقریباً بدون استفاده بوده و مقدار بسیار زیادی از آن به صورت کوه‌هایی اطراف کارخانجات ذوب‌آهن انباشـته شـده است. درصد بسیار کمی از آن برای تولید سیمان سرباره، در کارخانجات سیمان مصرف می‌شود که این مقدار با توجه به تولید سـالیانه‌ی سـرباره در کشـور بسـیار ناچیز اسـت. به عنوان مثال تولید سالیانه‌ی سرباره‌ی کارخانه

[1] International Energy Authority

فولاد مبارکه اصفهان ۸۵۰ هزار تن، کارخانه ذوب‌آهن اصفهان ۶۵۰ هزار و کارخانه فولاد خوزستان ۵۰۰ هزار تن است [۸]. در برخی موارد نیز سعی شده است که به عنوان سنگدانه در روسازی‌های بتنی مصرف شود.

آزمایش و آنالیز روی این ماده نشان می‌دهد که دارای منشأ غنی از سیلیس و کلسیم است و به دلیل تشابه منشأ آن به کلینکر سیمان توجه دانشمندان را برای آماده‌سازی و استفاده از آن به جای سیمان، به خود جلب کرده است. تحقیقات بر روی این ماده نشان می‌دهد که می‌تواند بدون حضور سیمان خاصیت چسبانندگی از خود نشان دهد. بنابراین با استفاده از این ماده، به جای کلینکر سیمان، انرژی که برای تولید کلینکر مصرف می‌شود و همچنین آلودگی‌های آن حذف می‌گردد.

اجرایی کردن این ایده در راستای توسعه پایدار و همچنین حفظ محیط زیست از آلاینده‌های خطرناک که موجب تخریب لایه‌ی اوزون و گرم شدن هوای کره‌ی زمین می‌شود، ارزشمند و تحقیقات بر روی آن در مناطق مختلف جهان قابل تحسین است. کشور ما نیز در حال توسعه و پیشرفت است و با توجه به این که سیمان بدون شک پر مصرف‌ترین ماده در ساخت و ساز، هم در فاز مسکونی و هم صنعتی است، مصرف بالای سیمان به چشم می‌خورد. همچنین به خاطر مسائل اقتصادی، در حال حاضر، سیمان مورد نیاز کشورهای اطراف، از جمله عراق را تأمین می‌کند. این موضوع، به خاطر آلودگی‌های زیاد کارخانجات سیمان، برای آب و هوای ایران بسیار مضر است؛ همانطور که در بسیاری از کشورهای پیشرفته، تعداد کارخانجات سیمان را کاهش و یا حتی به طور کامل تولید سیمان را ممنوع کرده و سیمان مورد نیاز را از طریق واردات تأمین می‌کنند. با توجه به پتانسیل کشور ایران در این زمینه، یعنی وجود کارخانجات متعدد ذوب‌آهن و فولاد، مطالعه و تحقیق بر روی سرباره‌ی حاصل از این کارخانجات و جایگزین کردن آن با کلینکر سیمان، بسیار ارزشمند است. مشکلاتی که در صورت استفاده از سرباره برای این منظور، با آن مواجه هستیم، عبارتند از:

۱- سرباره به خاطر سخت‌تر بودن آن نسبت به کلینکر، در آسیاب کردن، دچار مشکل می‌شود. به عبارت دیگر، استهلاک دستگاه‌های آسیاب‌کننده را افزایش می‌دهد. به همین دلیل باید از دستگاه‌های قوی‌تری استفاده شود.

۲- به دلیل متفاوت بودن معادن سنگ آهن، درصد سیلیس و کلسیم و سایر عناصر تشکیل‌دهنده‌ی آن، ثابت نبوده و ممکن است خواص بتن تولید شده توسط آن، به میزان کمی متفاوت باشد.

با وجود تمامی این مسائل، تلاش برای گسترش استفاده از این ماده‌ی چسباننده در صنعت، با توجه به اهمیت مسائل ذکر شده و مهم‌تر از همه، وجود کارخانجات ذوب‌آهن در کشور، بسیار ارزشمند است.

۱-۲ اهداف تحقیق

استفاده از سرباره به عنوان جایگزین کامل سیمان در بتن، تحت عنوان بتن قلیافعال، از دهه‌های اخیر در برخی از کشورهای دنیا رواج پیدا کرده است. همچنین در چند سال اخیر استفاده از این نوع ماده‌ی چسباننده در ایران نیز مورد تحقیق قرار گرفته است. در تحقیق حاضر استفاده از این نوع ماده‌ی چسباننده در ساخت بتن غلتکی روسازی راه، مورد بررسی قرار گرفته است.

در این پایان‌نامه در ابتدا سعی بر آن است تا یک الگوی مناسب برای ترکیب محلول فعال‌کننده انتخاب شود. پس از آن پیدا کردن یک روش قانونمند برای انجام آزمایشات رطوبت بهینه با توجه به متفاوت بودن وزن مخصوص ترکیبات مختلفِ محلولِ فعال‌کننده در مقایسه با آب، برای طرح‌های اختلاط، در دستور کار قرار می‌گیرد. در ادامه آزمایشات مقاومت فشاری و خمشی در سنین مختلف بتن انجام می‌گیرد. در ضمن روند کسب مقاومت برخی از طرح‌ها و همچنین تأثیر غلظت‌های مختلف محلول بر این روند مورد بررسی قرار می‌گیرد.

امکان استفاده از سرباره‌ی قلیافعال در تولید بتن غلتکی روسازی راه، منوط به این امر است که کارآیی آن در فاصله‌ی زمانی بین اختلاط آن و بتن‌ریزی آن از دست نرود. به عبارت دیگر برای حفظ مقاومت نهایی آن، چه میزان زمان برای بتن‌ریزی و تحکیم آن پس از ساخت بتن نیاز است. بنابراین آزمایشاتی تحت عنوان "زمان کوبش" بر روی برخی طرح‌ها صورت می‌گیرد تا این زمان مشخص گردد. همچنین تأثیر ترکیبات مختلف محلول بر این موضوع مورد بررسی قرار می‌گیرد. تأثیر شرایط عمل‌آوری بر روی بتن نیز مورد آزمایش و بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت یک طرح اختلاط بهینه هم از لحاظ اجرایی و هم از لحاظ اقتصادی ارائه می‌گردد.

۱-۳ پیکره‌بندی فصول پایان‌نامه

این رساله شامل پنج فصل است. در فصل اول تحت عنوان مقدمه، به توضیحاتی در مورد ضرورت‌های به کار گیری بتن غلتکی در روسازی راه‌ها اشاره می‌شود و پس از آن در خصوص ضرورت بازنگری در تولید سیمان و همچنین معرفی بتن قلیافعال بحث شده است. در فصل دوم نیز به معرفی بتن غلتکی روسازی راه و بتن قلیافعال و همچنین پیشینه‌ی تحقیقاتی آن دو پرداخته شده است. فصل سوم مصالح مورد استفاده، مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن‌ها معرفی شده است. در ادامه‌ی آن فصل، روش پیدا کردن طرح اختلاط مناسب، همچنین نحوه‌ی ساخت نمونه‌ها و شیوه‌ی انجام آزمایش‌ها ارائه شده است. فصل چهارم به نتایج آزمایشات و تأثیر عوامل مختلف بر مقاومت مکانیکی بتن غلتکی قلیافعال اختصاص داده شده است. در انتها، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری و همچنین پیشنهاداتی جهت انجام تحقیقات آتی، در فصل پنجم ارائه شده است.

۲ فصل دوم
بتن غلتکی قلیافعال

۲-۱ مقدمه

این فصل مبتنی بر دو بخش اصلی است: بخش اول روسازی بتنی غلتکی و بخش دوم بتن قلیافعال سربارهای. در ابتدای بخش اول، پس از مقدمهای بر بتن غلتکی، به معرفی انواع مختلف روسازیهای بتنی پرداخته شده و در ادامه به طور کامل بتن غلتکی روسازی راه و خواص بتن تازه و سخت شدهی آن، مورد بررسی قرار داده میشود. در بخش دوم به معرفی بتن قلیافعال پرداخته شده و مروری بر تحقیقات انجام شده در جوانب مختلف آن میگردد. پس از آن دو بخش اصلی در انتهای فصل، بتن غلتکی قلیافعال معرفی میشود.

طبق تعریف آییننامهای، بتن غلتکی[1] بتنی است با اسلامپ صفر که قبل از گیرش قادر به تحمل وزن غلتک برای متراکم کردن آن است [۹]. حساسیت این بتن به درصد آب موجود در طرح اختلاط آن بسیار بالا است. به طوری که درصد رطوبت آن باید در حدی باشد که به خوبی متراکم شود و از طرف دیگر هنگام تراکم رد[2] غلتک بر روی آن باقی نماند. در شکل ۲-۱ ظاهر بتن غلتکی با رطوبت مناسب نشان داده شده است.

[1] Roller Compacted Concrete
[2] Trace